

Научная статья
УДК 528.88
DOI: [10.34759/trd-2022-125-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-19)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Алексей Владимирович Кульвиц¹, Тимофей Андреевич Житников²,
Олег Юрьевич Михеев³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3}vka@mil.ru

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические аспекты обоснования баллистической структуры кластера малых космических аппаратов (МКА). Сформулирована постановка задачи и обоснованы основные требования функционирования МКА в составе кластера, которые позволяют обеспечить решение целевой задачи. Проведен анализ параметров орбит МКА, формирующих кластер МКА и позволяющих обеспечить устойчивое относительное положение МКА в пространстве с требуемой периодичностью. Приведены результаты решения многопараметрической задачи поиска баллистической структуры и практические рекомендации.

Ключевые слова: малый космический аппарат, кластер МКА, баллистическая структура, пространственная конфигурация

Для цитирования: Кульвиц А.В., Житников Т.А., Михеев О.Ю. Теоретические аспекты формирования кластера малых космических аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-19)

Original article

THEORETICAL ASPECTS OF THE FORMATION OF A CLUSTER OF SMALL SPACECRAFT

Alexey V. Kulvits¹, Timofey A. Zhitnikov²,

Oleg Yu. Mikheev³

^{1,2,3}Mozhaisky Military Space Academy,

Saint Petersburg, Russia

^{1,2,3}vka@mil.ru

Abstract. The article discusses the theoretical aspects of the substantiation of the ballistic structure of the cluster of small satellites. For the ballistic justification of the small satellites cluster, it is necessary to solve several interrelated tasks. First, it is necessary to justify the parameters of the orbits, the functioning of which would allow the cluster to successfully solve the target task. Secondly, after launching the small satellites into orbit, it is necessary to provide the required configuration in space, which is determined by the ballistic structure. Thirdly, due to the influence of disturbing factors acting on the small satellites while moving in orbits, the configuration will collapse over time. Therefore, the stable relative position of the small satellites in the cluster can be provided by the justification of the ballistic structure in orbits of the same radius and inclination. For the three small satellites as part of the formation implementing the tasks of radio monitoring by the difference-rangefinder method

(DRM), acceptable performance indicators are achieved when the small satellites form an equilateral triangle during operation, since in this case the accuracy indicators of the DRM are optimal, while the on-board equipment also imposes restrictions on the formation in the form of minimum and maximum relative distances between satellites.

Over time, the triangle formed by three small satellites deforms, while the indicators of solving the target problem decrease.

Thus, the task is reduced to determining the set of parameters of the orbits of the small satellites cluster with a restriction on the relative position, which will ensure the maximum time functioning of three small satellites in the cluster of the required configuration.

The proposed approach to solving this problem is based on the decomposition of the problem of finding optimal parameters into two special cases, which make it possible to determine the range of acceptable variants of ballistic structures of the small satellites cluster and thereby significantly reduce the area of possible iteration when solving the optimization problem.

The analysis of the parameters of the small satellites orbits and the ballistic structures of the cluster makes it possible to ensure a stable relative position of the small satellites in space with the required periodicity. The results of solving the multiparametric problem of searching for a ballistic structure can be used at the stages of ballistic design of satellite systems consisting of clusters of small satellites.

Keywords: small spacecraft, cluster of small spacecraft, ballistic structure, spatial configuration

For citation: Kulvits A.V., Zhitnikov T.A., Miheev O.Y. Theoretical aspects of the formation of a cluster of small spacecraft. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-19)

Введение

В настоящее время для решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно применяются спутниковые системы, состоящие из кластеров МКА [2,5,7]. Под кластером МКА понимается совокупность МКА различного целевого назначения, предназначенных для совместного выполнения общей целевой задачи и воспринимаемых потребителем как единое целое. Несмотря на широкое использование данного термина в научной литературе, иногда применяют и другие (например, в англоязычной терминологии «рой», «Formation Flying», в отечественной – «баллистически связанная группа КА», «формация» «космические аппараты группового полета») [1,3,4,6]. Способность приема информации с поверхности Земли одновременно всеми МКА кластера, позволяет существенно повысить характеристики наблюдения по сравнению с обычными спутниковыми системами. Это свойство активно применяется для целого спектра практических задач ДЗЗ. Кроме того, общая надежность спутниковой системы повышается, поскольку спутники могут частично заменять друг друга в случае поломок, так что неисправность одного спутника не влечёт утрату работоспособности всего кластера.

Постановка задачи

Для баллистического обоснования кластера МКА необходимо решить несколько взаимосвязанных задач. Во-первых, необходимо обосновать параметры

орбиты, функционирование на которой позволило бы успешно решать целевую задачу. Во-вторых, после выведения МКА на орбиту необходимо обеспечить требуемую конфигурацию в пространстве, которая определяется баллистической структурой. В-третьих, из-за влияния возмущающих факторов, действующих на МКА во время движения по орбите, конфигурация будет разрушаться с течением времени. Поэтому устойчивое относительное положение МКА в составе кластера, может быть обеспечено обоснованием баллистической структуры на орбитах одинакового радиуса и наклона [7,8,9,19].

В работе [11] установлено, что для тройки КА в составе формации реализующим задачи радиомониторинга разностно-дальномерным методом (РДМ) лучшим относительным положением является форма равностороннего треугольника, при этом бортовая аппаратура так же накладывает на формацию ограничения в виде минимального и максимального относительного расстояния между КА (d_{\min} , d_{\max}).

Таким образом, необходимо определить баллистическую структуру, кластера МКА, т.е. множество следующего вида

$$O_k(\Omega_2, u_2, \Omega_3, u_3), \quad (1)$$

где Ω_2, Ω_3 – прямое восхождение восходящего узла второго и третьего МКА; u_2, u_3 – аргумент широты второго и третьего МКА, которая обеспечит реализацию разностно-дальномерного метода (РДМ) работы бортовой аппаратуры МКА.

Условием реализации РДМ, кроме того является ограничение на относительное положение в пространстве МКА в составе кластера, т.е.

$$d_{\min} < d_{jk}(t) < d_{\max}, \quad (2)$$

где d_{\min}, d_{\max} – минимальное и максимальное расстояния между МКА соответственно.

Анализ, проведенный в работах [11,14], показывает, что допустимые показатели решения целевой задачи кластером МКА достигаются в том случае, когда МКА в процессе функционирования образуют равносторонний треугольник, так как в этом случае точностные показатели РДМ оптимальные.

С течением времени треугольник, образованный тремя МКА, деформируется, при этом показатели решения целевой задачи понижаются.

Таким образом, задача сводится к определению множества (1) при ограничении вида (2), которое обеспечит максимальное по времени функционирование трех МКА в составе кластера требуемой конфигурации.

1. Определение граничных условий поиска баллистической структуры кластера МКА

Рассмотрим случай произвольного расположения трех МКА в составе кластера для наклонных круговых орбит $i = i_{зад} < 90^\circ$, как представлено на рисунке 1. Обозначим баллистическую структуру кластера МКА u_j, Ω_j , где $j=1,2,3$ – номер МКА соответственно. Рассмотрим сферический треугольник ABC, в вершинах которого разместим МКА-1-3. Обозначим $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{23}$ стороны сферического треугольника, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ долготы подспутниковых точек, через ψ_1, ψ_3, ψ_2 широты подспутниковых точек. φ_{12} .

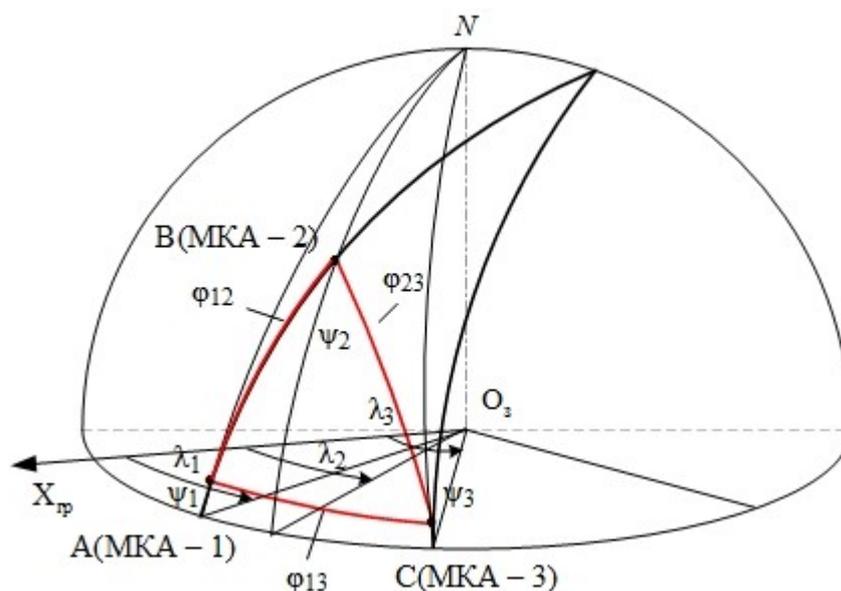


Рисунок 1 – Положение МКА в составе кластера для случая наклонных круговых орбит

Тогда, используя теорему косинусов для сферического треугольника ABC, получим

$$\begin{aligned}\cos \varphi_{12} &= \sin \psi_1 \sin \psi_2 + \cos \psi_1 \cos \psi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1), \\ \cos \varphi_{13} &= \sin \psi_1 \sin \psi_3 + \cos \psi_1 \cos \psi_3 \cos(\lambda_3 - \lambda_1), \\ \cos \varphi_{23} &= \sin \psi_2 \sin \psi_3 + \cos \psi_2 \cos \psi_3 \cos(\lambda_3 - \lambda_2).\end{aligned}$$

Для расчета тригонометрических функций координат подспутниковых точек можно использовать следующие формулы

$$\begin{aligned}\sin \psi_j &= \sin u_j \sin i, \\ \cos \psi_j \cos \lambda_j &= \cos \Omega_j \cos u_j - \sin \Omega_j \sin u_j \cos i, \\ \cos \psi_j \sin \lambda_j &= \sin \Omega_j \cos u_j + \cos \Omega_j \sin u_j \cos i.\end{aligned}$$

где $j = 1, 2, 3$.

После несложных преобразований получим систему уравнений

$$\begin{aligned}
\cos \varphi_{12} &= \sin u_1 \sin u_2 \sin^2 i + (\cos \Omega_1 \cos u_1 - \sin \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times (\cos \Omega_2 \cos u_2 - \sin \Omega_2 \sin u_2 \cos i) + \\
&(\sin \Omega_1 \cos u_1 - \cos \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times (\sin \Omega_2 \cos u_2 + \cos \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \\
\cos \varphi_{13} &= \sin u_1 \sin u_3 \sin^2 i + (\cos \Omega_1 \cos u_1 - \sin \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times (\cos \Omega_3 \cos u_3 - \sin \Omega_3 \sin u_3 \cos i) + \quad (3) \\
&(\sin \Omega_1 \cos u_1 - \cos \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times (\sin \Omega_3 \cos u_3 + \cos \Omega_3 \sin u_3 \cos i), \\
\cos \varphi_{23} &= \sin u_2 \sin u_3 \sin^2 i + (\cos \Omega_2 \cos u_2 - \sin \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \times (\cos \Omega_3 \cos u_3 - \sin \Omega_3 \sin u_3 \cos i) + \\
&(\sin \Omega_2 \cos u_2 - \cos \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \times (\sin \Omega_3 \cos u_3 + \cos \Omega_3 \sin u_3 \cos i)
\end{aligned}$$

Решая систему трансцендентных уравнений (3) при заданных значениях $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{23}$, можно рассчитать $d_{jk}(t)$ и обеспечить требуемую конфигурацию кластера МКА в фиксированный момент времени. Таким образом, между баллистической структурой кластера МКА и требуемой конфигурацией в пространстве существует зависимость, определяемая системой (3) и имеющая характер сложной многопараметрической функции времени. При этом, как показывает анализ работ [15,16,17,20], для поиска баллистической структуры кластера МКА, которая обеспечит длительное функционирование требуемой конфигурации в пространстве необходимо осуществить перебор вариантов баллистических структур и используя (3) выбрать оптимальную. Предлагаемый подход к решению данной задачи основывается на декомпозиции данной задачи на два частных случая, которые позволяют определить область допустимых вариантов баллистических структур кластера МКА и тем самым существенно снизить область возможного перебора при решении данной задачи.

2. Поиск баллистической структуры кластера МКА для случая расположения в двух плоскостях

Рассмотрим случай, когда МКА располагаются в двух плоскостях на круговых наклонных орбитах. В этом случае баллистическая структура кластера МКА будет задаваться 5-ю кеплеровскими элементами орбиты.

Пусть МКА-1 располагается на экваторе, тогда $u_1 = 0, \Omega_1 = 0$. Множество баллистических структур кластера МКА будет принадлежать следующему диапазону:

$$u_1 = 0^\circ, \iota z_1 = \nu^\circ - \text{МКА-1},$$

$$u_2 \in (u^{\text{доп}}, u_2 \neq 0^\circ), \iota z_2 = \nu^\circ - \text{МКА-2},$$

$$u_3 \in u^{\text{доп}}, \Omega_3 \in \Omega^{\text{доп}} - \text{МКА-3}.$$

Динамика относительного движения МКА в составе кластера в случае, когда расстановка МКА, определяющая баллистическую структуру, происходит в окрестностях экватора, показывает, что максимальное расстояние между МКА будет на экваторе, а минимальное в окрестностях точек вертекса и апекса. Поэтому нет необходимости рассматривать баллистические структуры кластеров МКА, которые изначально не обладают относительным положением в виде равностороннего треугольника на экваторе. Далее эти структуры только деформируются (появляется тупой угол), но не становятся лучше.

Рассмотрим сферический треугольник ABC (Рисунок 2).

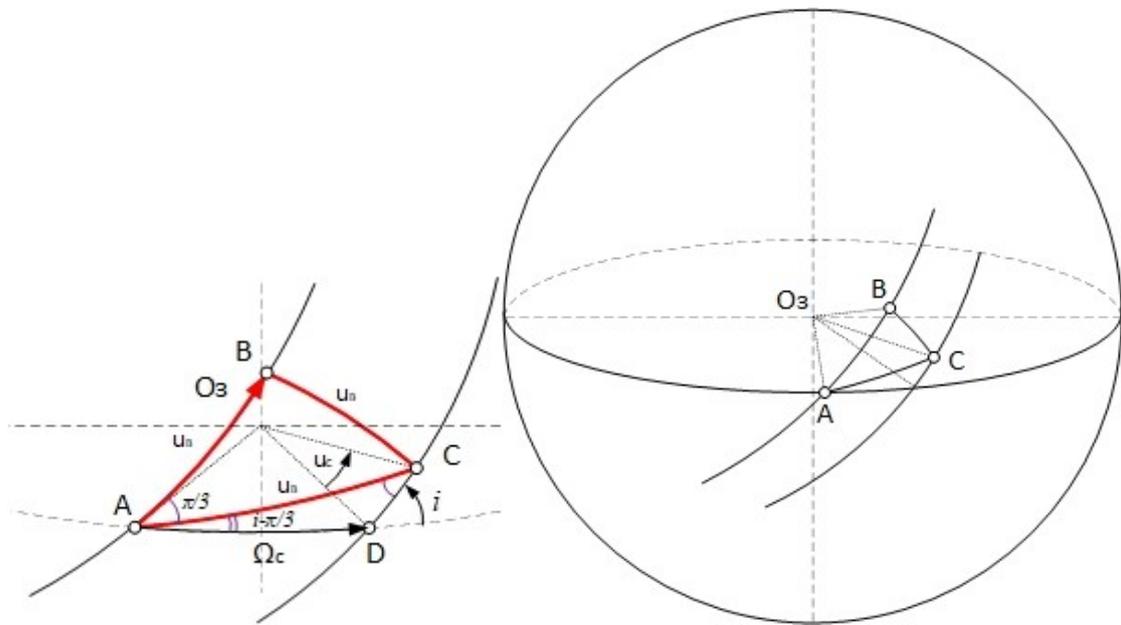


Рисунок 2 – Проекция подспутниковых точек МКА на сфере (слева); общий вид проекции кластера МКА на поверхность Земли (справа)

В сферическом треугольнике ABC: $\angle A = \angle B = \angle C = \pi/3$, тогда для сферического треугольника ACD обозначим углы:

$$\begin{aligned}\angle ACD &= \angle E = \pi/3 \\ \angle ADC &= \angle D = \pi - i \\ \angle CAD &= \angle F = i - \pi/3\end{aligned}$$

и стороны:

$$\begin{aligned}AD &= e = \Omega_C \\ AC &= d = u_B \\ CD &= f = u_C\end{aligned}$$

Тогда по теореме синусов получим

$$\sin f \sin D = \sin d \sin F,$$

откуда

$$f = \arcsin\left(\frac{\sin d \sin F}{\sin D}\right)$$

Воспользовавшись рисунком 2, получим

$$u_c = \arcsin\left(\frac{\sin u_B \sin(i - \pi/3)}{\sin(\pi - i)}\right)$$

Тогда

$$\sin e \sin D = \sin d \sin E ,$$

откуда

$$e = \arcsin\left(\frac{\sin d \sin E}{\sin D}\right) ,$$

$$\Omega_c = \arcsin\left(\frac{\sin u_B \sin(\pi/3)}{\sin(\pi - i)}\right) .$$

Таким образом, для значений d_{\min} , d_{\max} из ограничения (2) можно получить баллистическую структуру кластера МКА, которая будет соответствовать граничным условиям и при этом обеспечивать равносторонний треугольник в пространстве. Далее необходимо для каждой баллистической структуры, которая принадлежит граничным условиям, смоделировать движение каждого МКА и оценить их по суммарному (интегральному) показателю качества функционирования на интервале прогноза.

3. Поиск баллистической структуры кластера МКА для случая расположения в трех плоскостях

Рассмотрим вариант, когда МКА располагаются в трех плоскостях, при этом все плоскости имеют одинаковое наклонение $i_1 = i_2 = i_3 = i$. Рассмотрим проекции МКА на сфере (Рисунок 3).

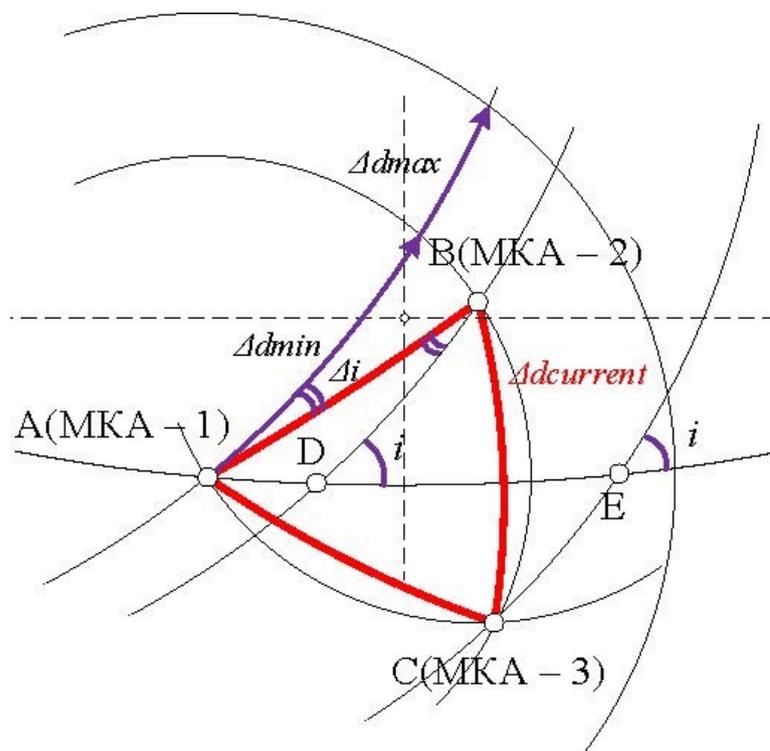


Рисунок 3 – Проекция подспутниковых точек кластера МКА на сфере

Обозначим буквами D и E пересечения плоскостей, соответствующих МКА с экватором. Также обозначим текущее (требуемое) относительное расстояние между КА через $\Delta d_{current}$. На рисунке $\Delta d_{current} = \Delta d_{min}$. Тогда стороны

$$DB = u_2, AD = \Omega_2, EC = u_3, AE = \Omega_3$$

Рассмотрим теперь подробнее треугольник ABD на рисунке 4.

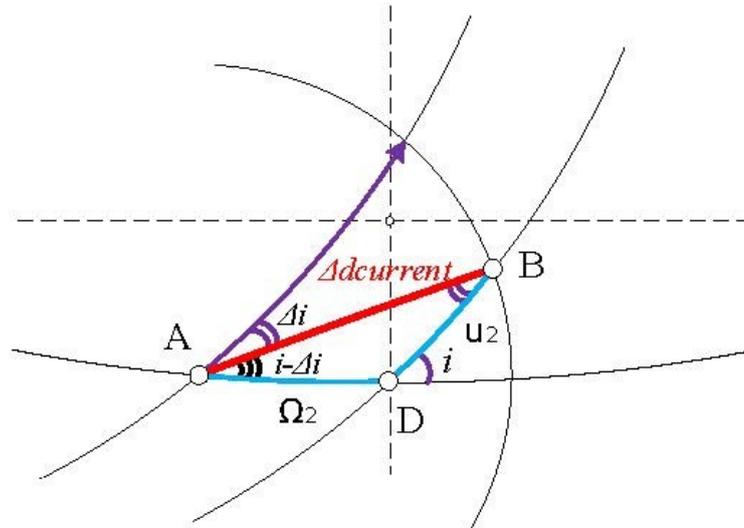


Рисунок 4 – Проекция сферического треугольника ABD на сферу

Для сферического треугольника ABD:

$$\angle A = i - \Delta i$$

$$\angle B = \Delta i$$

$$\angle D = \pi - i$$

По теореме синусов получим

$$\sin(u_2) \sin(\pi - i) = \sin(\Delta dcurrent) \sin(i - \Delta i) ,$$

тогда

$$u_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\Delta dcurrent) \sin(i - \Delta i)}{\sin(\pi - i)}\right) ,$$

$$\sin(\Omega_2) \sin(\pi - i) = \sin(\Delta dcurrent) \sin(\Delta i) ,$$

и

$$\Omega_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\Delta dcurrent) \sin(\Delta i)}{\sin(\pi - i)}\right) .$$

Таким образом, определили положение МКА-2, а именно параметры Ω_2 и u_2 при заданном относительном положении $(\Delta dcurrent)$ и Δi .

Теперь рассмотрим подробнее треугольник АЕС на рисунке 5.

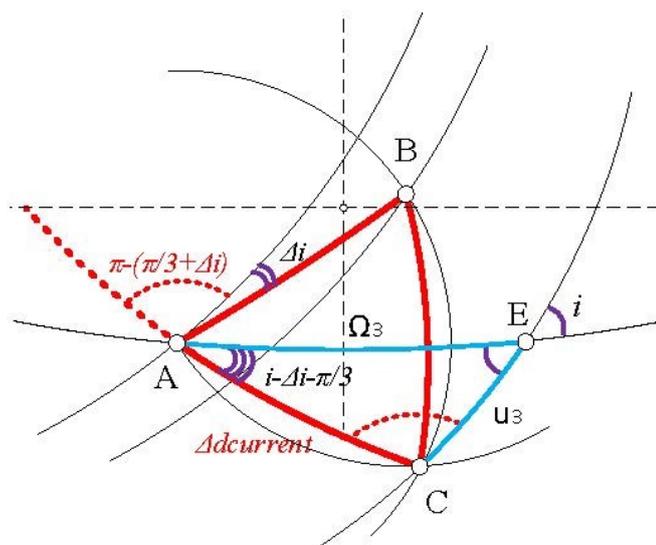


Рисунок 5 – Проекция сферического треугольника АЕС на сферу

Для сферического треугольника АЕС:

$$\angle A = i - \Delta i - \pi / 3$$

$$\angle E = i$$

$$\angle C = \pi - (\pi / 3 + \Delta i)$$

При этом стороны:

$$AE = \Omega_3$$

$$EC = u_3$$

$$AC = \Delta dcurrent$$

Тогда, по теореме синусов получим

$$\sin(u_3) \sin(i) = \sin(\Delta dcurrent) \sin(i - \Delta i - \pi / 3) ,$$

откуда

$$u_3 = \arcsin \left(\frac{\sin(\Delta dcurrent) \sin(i - \Delta i - \pi / 3)}{\sin(i)} \right) ,$$

$$\sin(\Omega_3) \sin(i) = \sin(\Delta dcurrent) \sin(\pi - (\pi / 3 + \Delta i)) ,$$

и

$$\Omega_3 = \arcsin\left(\frac{\sin(\Delta d_{\text{current}}) \sin(\pi - (\pi/3 + \Delta i))}{\sin(i)}\right).$$

Таким образом, однозначно определили положение МКА-3, а именно параметры Ω_3 и u_3 для заданных $(\Delta d_{\text{current}})$ и Δi .

Таким образом, зная $d_{\text{min}}, d_{\text{max}}$, а также рассчитав граничные условия параметров МКА-2 $[0, i]$, для каждого значения $\Delta d_{\text{current}} \in [\Delta d_{\text{min}}, \Delta d_{\text{max}}]$, можем найти все варианты баллистических структур с заданным шагом $\Delta i \in [0, i]$, образующих равносторонний треугольник и отвечающий заданным ограничениям по относительному положению (рисунок 6). Далее необходимо для каждой баллистической структуры, которая принадлежит граничным условиям, смоделировать движение каждого МКА кластера и оценить их по суммарному (интегральному) показателю качества функционирования на интервале прогноза.

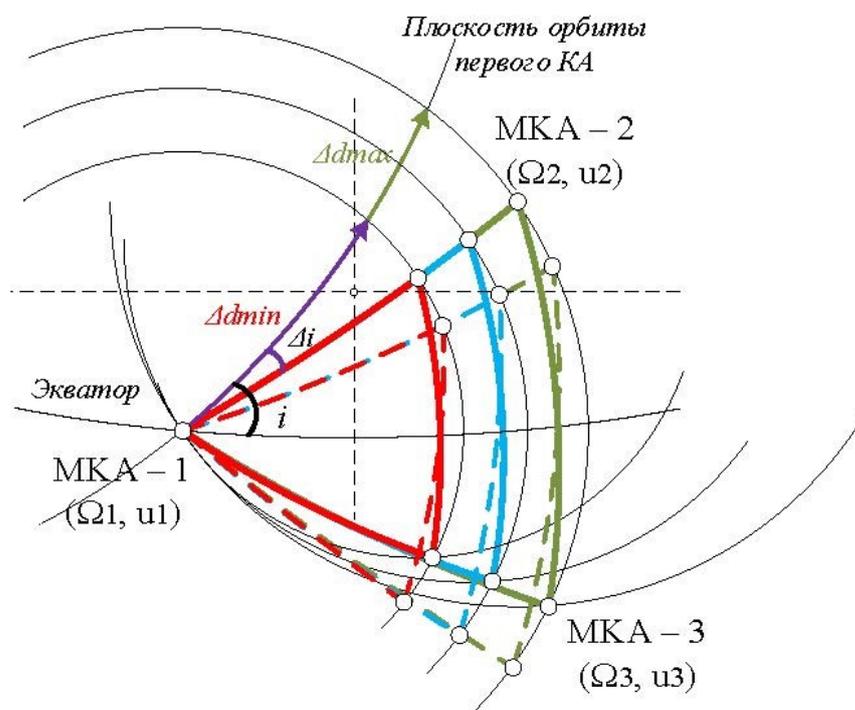


Рисунок 6 – К расчету множества баллистических структур кластера МКА

Пример вариантов баллистических структур кластера МКА для случая круговых орбит радиусом 7000 км и наклона 63 градуса представлен в табл. 1 и на рисунке 7.

Таблица 1 – Варианты баллистических структур кластера МКА и их характеристики

№	u_2 , град	Ω_2 , град	u_3 , град	Ω_3 , град	Δd_{12} , км	Δd_{13} , км	Δd_{23} , км	$\angle A$ град	$\angle B$ град	$\angle C$ град
1	0.409	0	0.024	0.398	50	50	50	60	60	60
2	0.509	0	0.03	0.495	62.217	62.217	62.217	60	60	60
3	0.609	0	0.036	0.592	74.435	74.434	74.433	59.99	60	60.01
4	0.709	0	0.042	0.689	86.652	86.652	86.65	59.99	60	60.01
5	0.809	0	0.048	0.787	98.869	98.869	98.867	59.99	60	60.01

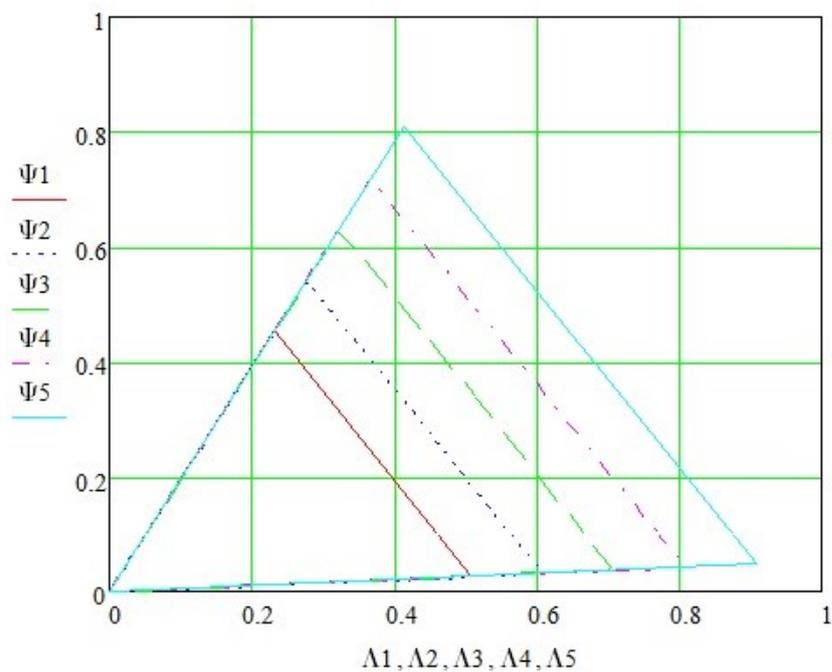


Рисунок 7 – Геометрическая интерпретация вариантов баллистических структур кластера МКА

Заключение

Предложенный подход позволяет определить оптимальные варианты баллистических структур кластера МКА требуемой конфигурации в пространстве, существенно снизив область поиска допустимых вариантов. Проведенный анализ параметров орбит МКА и баллистических структур кластера, позволяет обеспечить устойчивое относительное положение МКА в пространстве с требуемой периодичностью. Приведенные результаты решения многопараметрической задачи поиска баллистической структуры, могут быть использованы на этапах баллистического проектирования спутниковых систем состоящих из кластеров МКА.

Список источников

1. Макриденко Л.А., Минаев И.В., Потюпкин А.Ю. Концептуальные особенности повышения целевой эффективности малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 141. № 4. С. 17–22.
2. 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. № 4. С. 45–56. DOI [10.17238/issn2409-0239.2017.4.45](https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.45).
3. Клименко Н.Н. Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоизлучения // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 2 (95). DOI: [10.30981/2587-7992-2018-95-2-48-57](https://doi.org/10.30981/2587-7992-2018-95-2-48-57).

4. Аверкиев Н.Ф., Кульвиц А.В., Житников Т.А. Многоуровневая баллистическая структура кластерной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. Т. 21. № 3. С. 105–114.
5. Ключников В.Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 423–428.
6. Палкин М.В. Концептуальные вопросы создания и применения космических аппаратов группового полета // Наука и образование. 2015. № 8. С. 100–115.
7. Guzman J.J., Edery A. Mission design for the MMS tetrahedron formation // IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004, vol. 1, pp. 540.
DOI:[10.1109/AERO.2004.1367637](https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1367637)
8. Roscoe W.T. et al. Optimal Formation Design for Magnetospheric Multiscale Mission Using Differential Orbital Elements // Journal. Guidance, Control, and Dynamics, 2010, vol. 34, no. 4, pp. 1070-1080. DOI:[10.2514/6.2010-7958](https://doi.org/10.2514/6.2010-7958)
9. Маштаков Я.В., Шестаков С.А. Построение некоторых опорных относительных орбит для тетраэдральной конфигурации спутников // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 84. 26 с. DOI:[10.20948/prepr-2017-84](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-84)
10. Проценко П.А., Хуббиев Р.В. Методика ранжирования КА ДЗЗ с целью оперативного мониторинга ЧС // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=134557>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-18)
11. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. - М.: Машиностроение, 1978. – 54 с.
12. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. - М.: Наука, 1977. - 872 с.

13. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов. - СПб: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2007. - 435 с.
14. Бахтин А.А., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85828>
15. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85921>
16. Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А., Кирмель А.С. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
17. Лохматкин В.В. Модели для оценки показателей интегральной производительности съемки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учетом надежности на этапе электрических испытаний // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93348>
18. Ваганов А.А., Неелова О.Н., Онуфрей А.Ю. Модель орбитальной группировки сверхмалых космических аппаратов для мониторинга чрезвычайных ситуаций // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 666. С. 7-17.
19. Назаров А.Е. Обеспечение динамической устойчивости орбитальной структуры космической системы «Арктика-М» // Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина». 2013. № 2(18). С. 58–64.

20. Волков В.Ф., Кульвиц А.В., Коваленко А.Ю., Салухов В.И. Прикладные аспекты оптимизации орбитальных структур спутниковых систем за счет уточнения параметров орбитального движения // Труды СПИИРАН. 2020. № 4(35). С. 719-745. DOI: [10.15622/sp.2020.19.4.1](https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.4.1).

References

1. Makridenko L.A., Minaev I.V., Potyupkin A.Yu. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*, 2014, vol. 141, № 4, pp. 17–22.
2. Potyupkin A.Yu., Danilin N.S., Selivanov A.S. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 45–56. DOI [10.17238/issn2409-0239.2017.4.45](https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.45).
3. Klimenko N.N. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2018, no. 2 (95). DOI: [10.30981/2587-7992-2018-95-2-48-57](https://doi.org/10.30981/2587-7992-2018-95-2-48-57).
4. Averkiev N.F., Kul'vits A.V., Zhitnikov T.A. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 105–114.
5. Klyushnikov V.Yu. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 423–428.
6. Palkin M.V. *Nauka i obrazovanie*, 2015, no 8, С. 100–115.
7. Guzman J.J., Edery A. Mission design for the MMS tetrahedron formation, *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, vol. 1, pp. 540. DOI: [10.1109/AERO.2004.1367637](https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1367637)
8. Roscoe W.T. et al. Optimal Formation Design for etospheric MultiscaleMission Using Differential Orbital Elements, *Journal. Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, vol. 34, no. 4, pp. 1070-1080. DOI: [10.2514/6.2010-7958](https://doi.org/10.2514/6.2010-7958)

9. Mashtakov Ya.V., Shestakov S.A. *Preprinty IPM im. M.V.Keldysha*, 2017, no. 84, 26 p.
DOI: [10.20948/prepr-2017-84](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-84)
10. Protsenko P.A., Khubbiev R.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=134557>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-18)
11. Saibel' A.G. *Osnovy teorii tochnosti radiotekhnicheskikh metodov mestooprdeniya* (The accuracy theory fundamentals of radio engineering field methods), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 54 p.
12. Vygodskii M.Ya. *Spravochnik po vysshei matematike* (Higher mathematics handbook), Moscow, Nauka, 1977, 872 p.
13. Vlasov S.A., Mamon P.A. *Teoriya poleta kosmicheskikh apparatov* (Spacecraft flight theory), Saint Prtersburg: VKA im. A.F.Mozhaiskogo, 2007, 435 p.
14. Bakhtin A.A., Omel'yanchuk E.V., Semenova A.Yu. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85828>
15. Emel'yanov A.A., Malyshev V.V., Smol'yaninov Yu.A., Starkov A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85921>
16. Vasil'kov Yu.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel' A.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
17. Lokhmatkin V.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93348>
18. Vaganov A.A., Neelova O.N., Onufrei A.Yu. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 666, pp. 7-17.
19. Nazarov A.E. *Vestnik «NPO im. S.A. Lavochkina»*, 2013, no. 2(18), pp. 58–64.

20. Volkov V.F., Kul'vits A.V., Kovalenko A.Yu., Salukhov V.I. *Trudy SPIIRAN*, 2020, no. 4(35), pp. 719-745. DOI: [10.15622/sp.2020.19.4.1](https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.4.1).

Статья поступила в редакцию 05.06.2022

Статья после доработки 07.06.2022

Одобрена после рецензирования 01.07.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 05.06.2022; approved after reviewing on 01.07.2022; accepted for publication on 25.08.2022